

## Luento 4: Kolmiointihavainnot

### Luento 4: Kolmiointihavainnot

Reconstruction procedure

Kuvahavainnot

Kollineaarisuusyhtälö

Kuvahavainnot suuntahavaintoina

Kuvausvirheet

Refraktio

Karttaprojektio ja maankaarevuus

Objektiivin virheet

Sisäinen orientointi

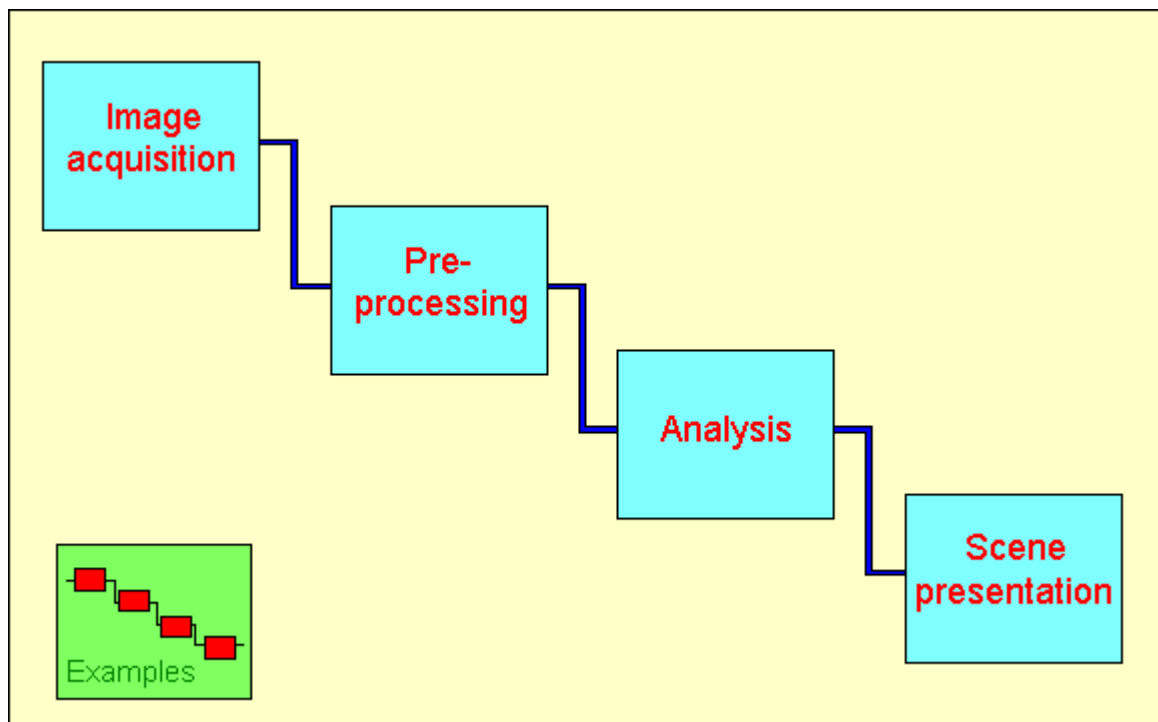
Kalibroitimenetelmät

Goniometrikalibrointi

Testikenttäkalibrointi ennen 2000-lukua

Testikenttäkalibrointi suorassa georeferoinnissa

Kirjallisuutta



Reconstruction procedure.

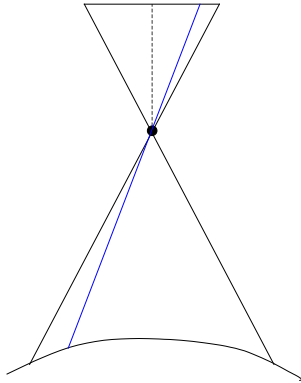
### Reconstruction procedure

- Image acquisition (e.g. control survey, targeting, photography, image digitizing)

- Preprocessing (e.g. radiometric transformation, orientation, coordinate transformation, georeferencing)
- Analysis (e.g. image interpretation, 3D-digitizing, modelling)
- Scene presentation (e.g. orthophotography, cartography, texture mapping, VRML-modeling)

## Kuvahavainnot

### Kollineaarisuusyhtälö

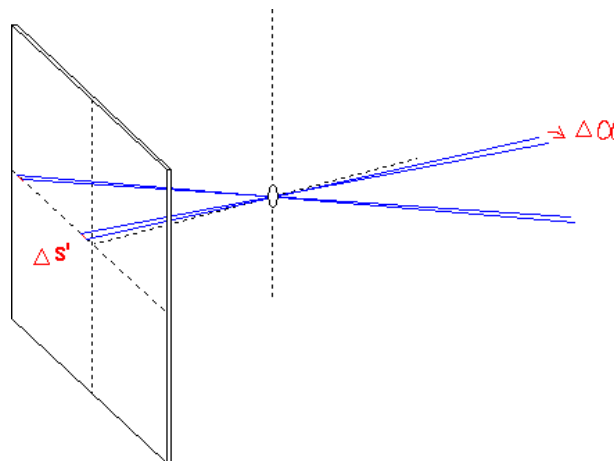


$$x'_{ij} = -c \frac{a_{11i}(X_j - X_{oi}) + a_{21i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{31i}(Z_j - Z_{oi})}{a_{13i}(X_j - X_{oi}) + a_{23i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{33i}(Z_j - Z_{oi})}$$

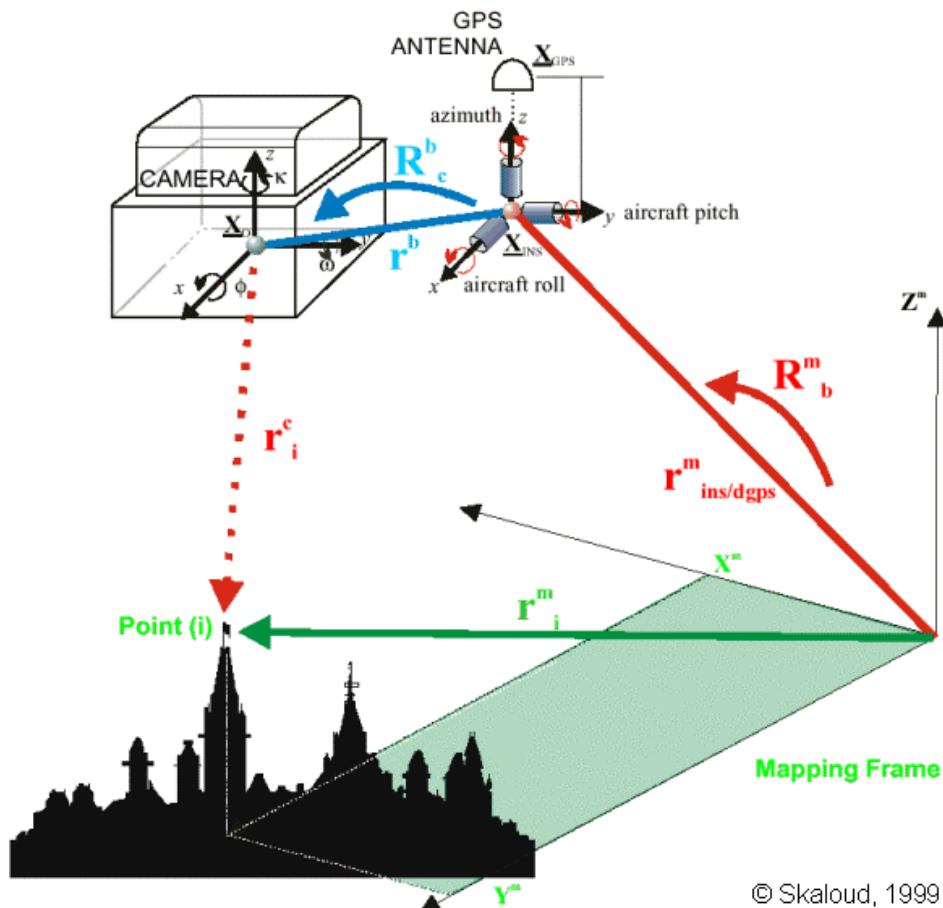
$$y'_{ij} = -c \frac{a_{12i}(X_j - X_{oi}) + a_{22i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{32i}(Z_j - Z_{oi})}{a_{13i}(X_j - X_{oi}) + a_{23i}(Y_j - Y_{oi}) + a_{33i}(Z_j - Z_{oi})}$$

### Kuvahavainnot suuntahavaintoina

- Kolmioinnissa havaintoina käytetään kuvakoordinaatteja, jotka muunnetaan pääpistekeskisiksi kamerakoordinaateiksi.
- Kamerakoordinaatit vastaavat suuntahavaintoja, jotka ovat tuttuja geodeettisesta paikanmäärittämisestä.
- Tavanomaisessa ilmakuvakamerassa, jonka kuvakoko on 230 mm x 230 mm:
  - kameravakio  $c = 150$  mm, jolloin 0,001 mm:n eli 1  $\mu$ m:n [mikrometrin, mikronin] erotuskyky kuvahavainnossa vastaa suuntahavainnon erotuskykyä 0,4 mgon kuvan keskellä, ja 0,3 mgon kuvan reunassa, tai
  - kameravakio  $c = 210$  mm, jolloin 0,001 mm:n erotuskyky kuvahavainnossa vastaa suuntahavainnon erotuskykyä 0,3 mgon kuvan keskellä, ja 0,2 mgon kuvan reunassa.



Suuntahavaintojen erotuskyky.

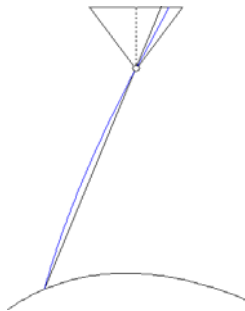


Measurement of image orientation in the air with subsequent determination of object space quantities on the ground is equivalent to extrapolation. As small errors may have large consequences, system needs to be extremely well calibrated. (Heipke, 2001)

## Kuvausvirheet

- Kuvablokin samasuoraisuusehto edellyttää lineaarista kuvausta pisteen kohde- ja kuvakoordinaattien välillä.
- Poikkeamia aiheuttavat:
  - karttaprojektio ja maankaarevuus
  - refraktio ilmakehässä
  - kameran objektiivin virheet
  - kameran kuvataso eli kuvaportin poikkemat tasomaisuudesta (= poikkeama kuvahavaintojen samatasoisuudesta)
  - filmin deformatio kuvanoton ja mittaushetken välillä
- Em. virheiden vaikutus voidaan kompensoida joko korjaamalla havaintoja, tai laajentamalla samasuoraisuusehtoa lisäparametrein blokkitasoituksen yhteydessä.
- Edellisten lisäksi orientointivirheet aiheuttavat poikkeamia samasuoraisuusehdon toteutumiseen.
- Suoran georeferoinnin menetelmien kehittymisen myötä kuvausvirheet ja kalibrointi ovat jälleen nousemassa tärkeiksi kysymyksiksi.
- [Refraction and earth curvature](#)

## Refraktio

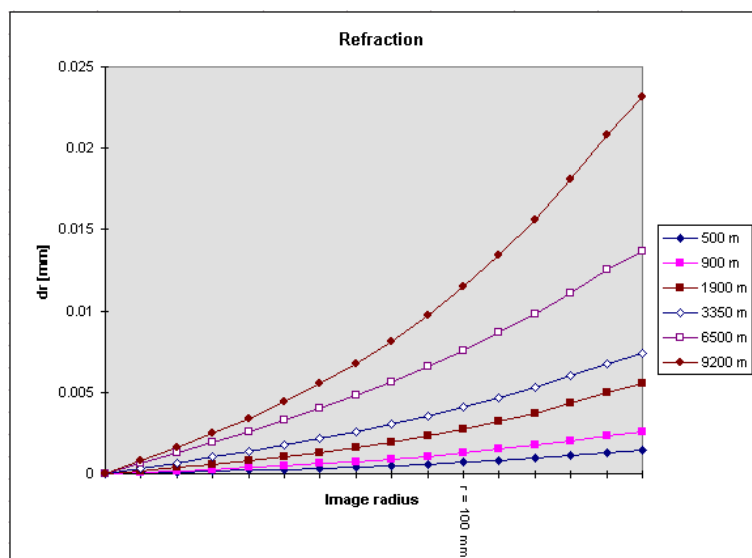


$$dr = k \cdot \left( r + \frac{r^3}{c^2} \right)$$

$$k = \left( \frac{2410 \cdot H}{H^2 - 6 \cdot H + 250} - \frac{2410 \cdot h}{h^2 - 6 \cdot h + 250} \cdot \frac{h}{H} \right) \cdot 10^{-6}$$

H lentokorkeus [km]  
 h maanpinnan korkeus [km]  
 r pisteen etäisyys pääpisteestä [mm]  
 c kameravakio [mm]

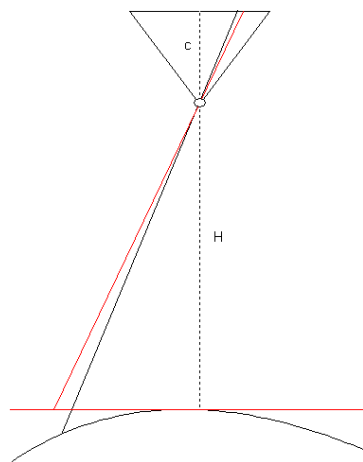
### Refraktio.



## Karttaprojektio ja maankaarevuus

Maankaarevuuden korjaus

$$dr = \frac{H \cdot r^3}{2 \cdot R \cdot c^2}$$

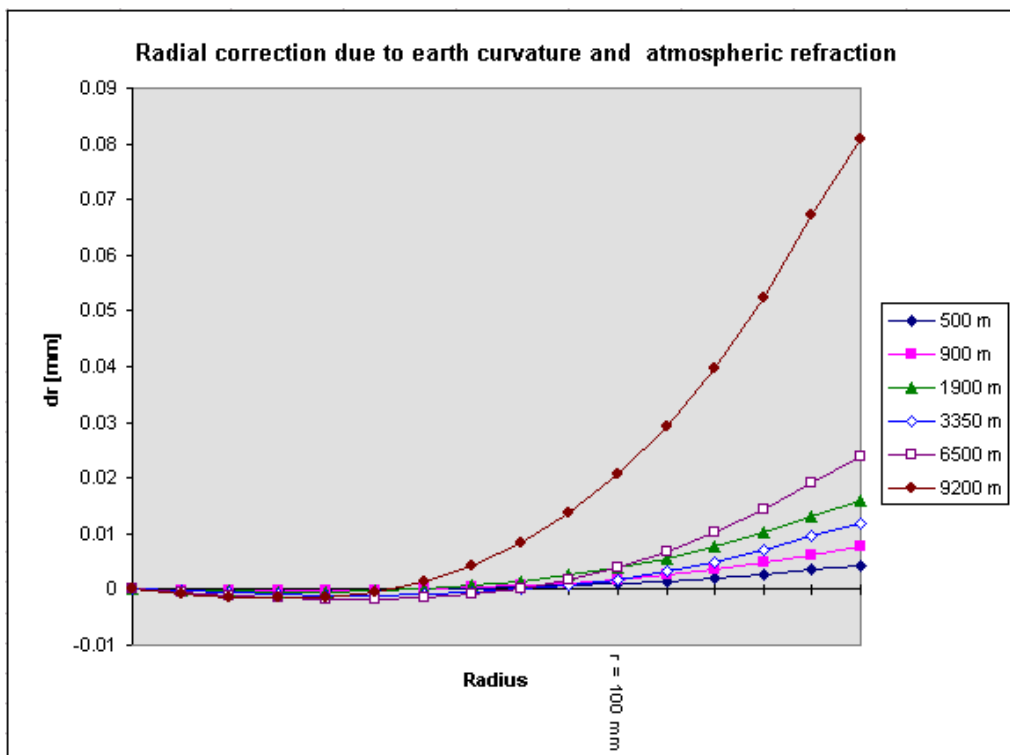
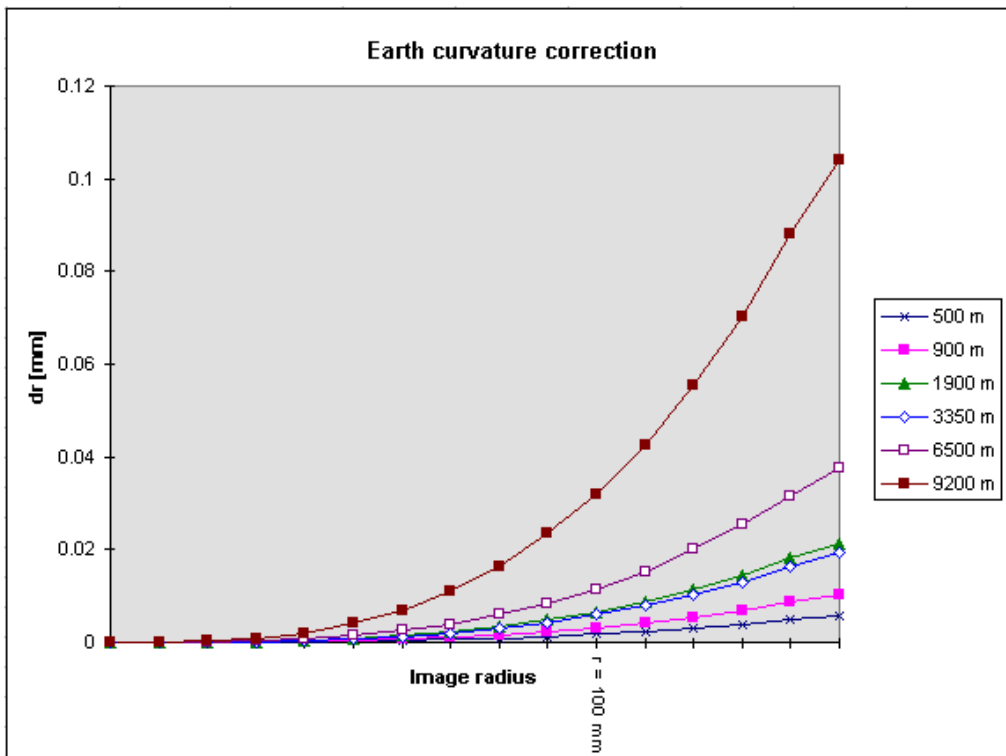


Projektiokorjaus

$$\begin{cases} dx = \frac{Y^2}{2 \cdot R^2} \cdot x + \frac{r^2 \cdot H \cdot Y_0}{2 \cdot R^2 \cdot c} \cdot \sin \alpha \\ dy = \frac{Y^2}{2 \cdot R^2} \cdot y + \frac{r^2 \cdot H \cdot Y_0}{2 \cdot R^2 \cdot c} \cdot \cos \alpha \end{cases}$$

R maan keskikaarevuussäde [km]  
 Y projektiokeskuksen etäisyys keskimeridiaanista [km]  
 $Y_0$  pisteen etäisyys keskimeridiaanista [km]  
 $\alpha$  x-akselin suunta Gauss-Krüger-tasolla

### Maankaarevuus ja karttaprojektio.

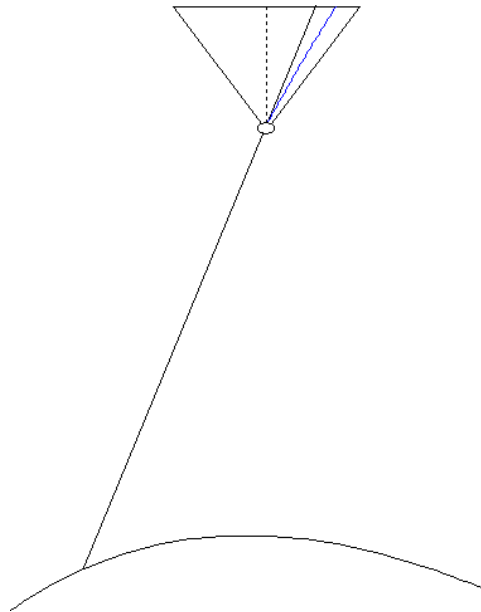


- References
  - [Marko Ollikainen, The Finnish national grid coordinate system](#)

## Objektiivin virheet

- Objektiivin piirtovirheet johtuvat eroista osalinssien refraktio-ominaisuuksissa ja objektiivin valmistuksessa syntyvistä valmistusepätarkkuuksista.
- Piirtovirhettä tarkastellaan valonsäteen poikkeamana suorasta, joka kulkee kohdepisteen, projektiokeskuksen ja terävänä kuvautuvan kuvapisteen kautta. Piirtovirheen tyypit: symmetrinen radiaalinen piirtovirhe (radial distortion), epäkeskisyys piirtovirhe (decentering distortion) ja epäsäännöllinen piirtovirhe.
- Piirtovirhe määritetään kuvatasolla joko symmetrisenä tai epäkeskisenä kuvan pääpisteen suhteen.
- Symmetrinen piirtovirhe on tietyllä etäisyydellä pääpisteestä kaikissa suunnissa sama, ja on radiaalista eli siirtää kuvapistettä joko pääpisteen suuntaan tai siitä poispäin.
- Epäkeskinen piirtovirhe on symmetrinen pääpisteen kautta kulkevan lävistäjän suhteen, ja voi olla joko radiaalista tai tangentialista.
- [Radial distortion](#)

### Radiaalinen piirtovirhe



Radiaalisen piirtovirheen syntyminen.

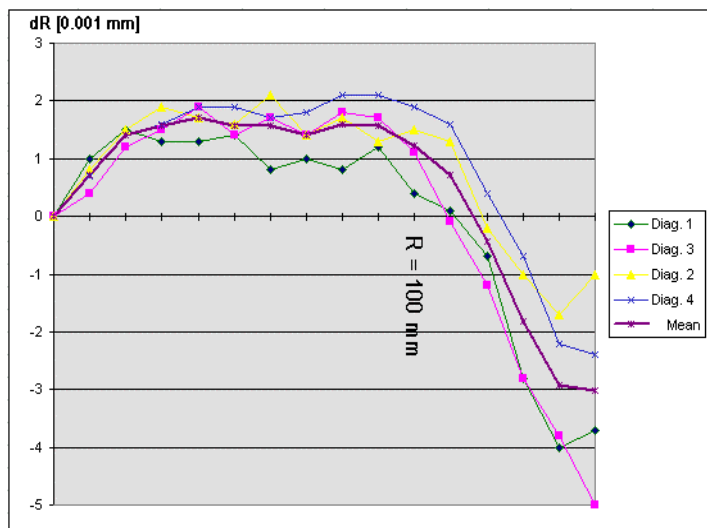
$$\delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots$$

$$\delta r_x = (x - x_0) (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

$$\delta r_y = (y - y_0) (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots)$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

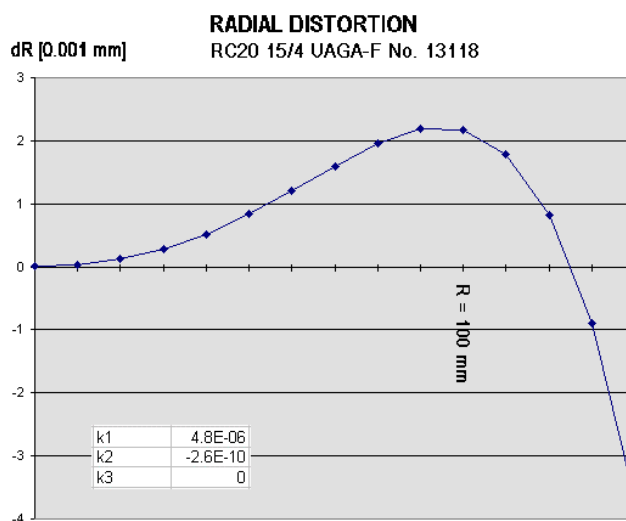
Radiaalisen piirtovirheen vaikutus kamerakoordinaatteihin. Ks. myös: [Esimerkki](#) piirtovirheestä digitaalikameroilla.



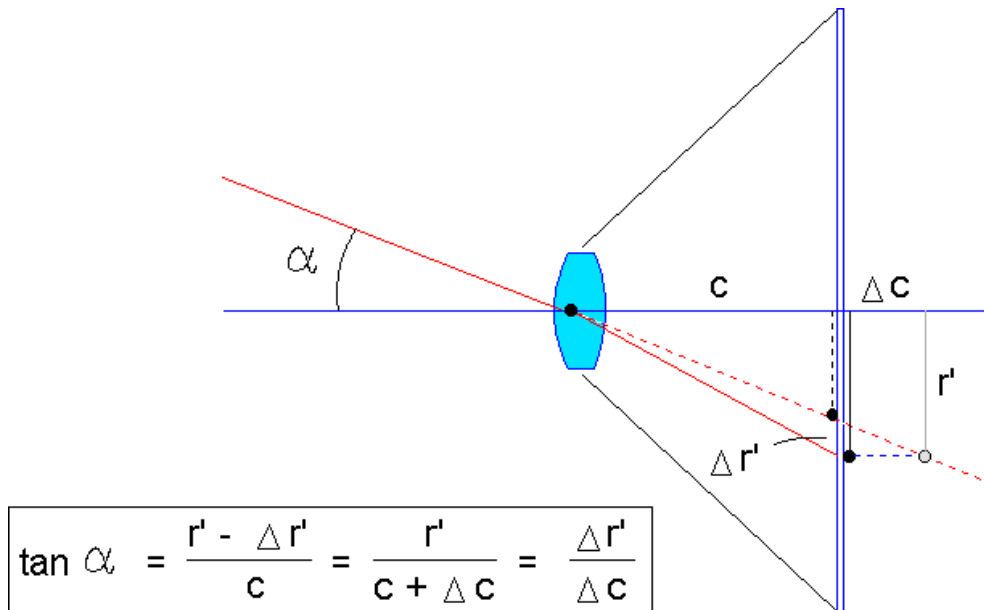
Radiaalinen piirtovirhe kuvan neljän lävistäjän suunnassa.

Radius	Diag. 1	Diag. 3	Diag. 2	Diag. 4	Mean
0	0	0	0	0	0
10	1	0.4	0.8	0.7	0.725
20	1.5	1.2	1.5	1.4	1.4
30	1.3	1.5	1.9	1.6	1.575
40	1.3	1.9	1.7	1.9	1.7
50	1.4	1.4	1.6	1.9	1.575
60	0.8	1.7	2.1	1.7	1.575
70	1	1.4	1.4	1.8	1.4
80	0.8	1.8	1.7	2.1	1.6
90	1.2	1.7	1.3	2.1	1.575
100	0.4	1.1	1.5	1.9	1.225
110	0.1	-0.1	1.3	1.6	0.725
120	-0.7	-1.2	-0.2	0.4	-0.425
130	-2.8	-2.8	-1	-0.7	-1.825
140	-4	-3.8	-1.7	-2.2	-2.925
148	-3.7	-5	-1	-2.4	-3.025

Radiaalinen piirtovirhe arvoina.

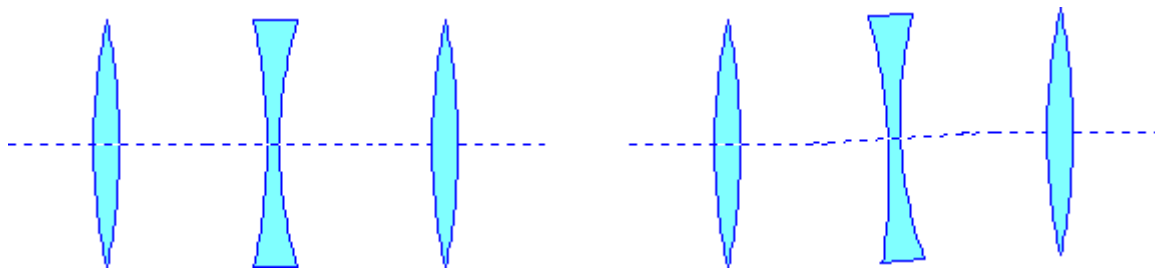


Radiaalinen piirtovirhe funktiona.



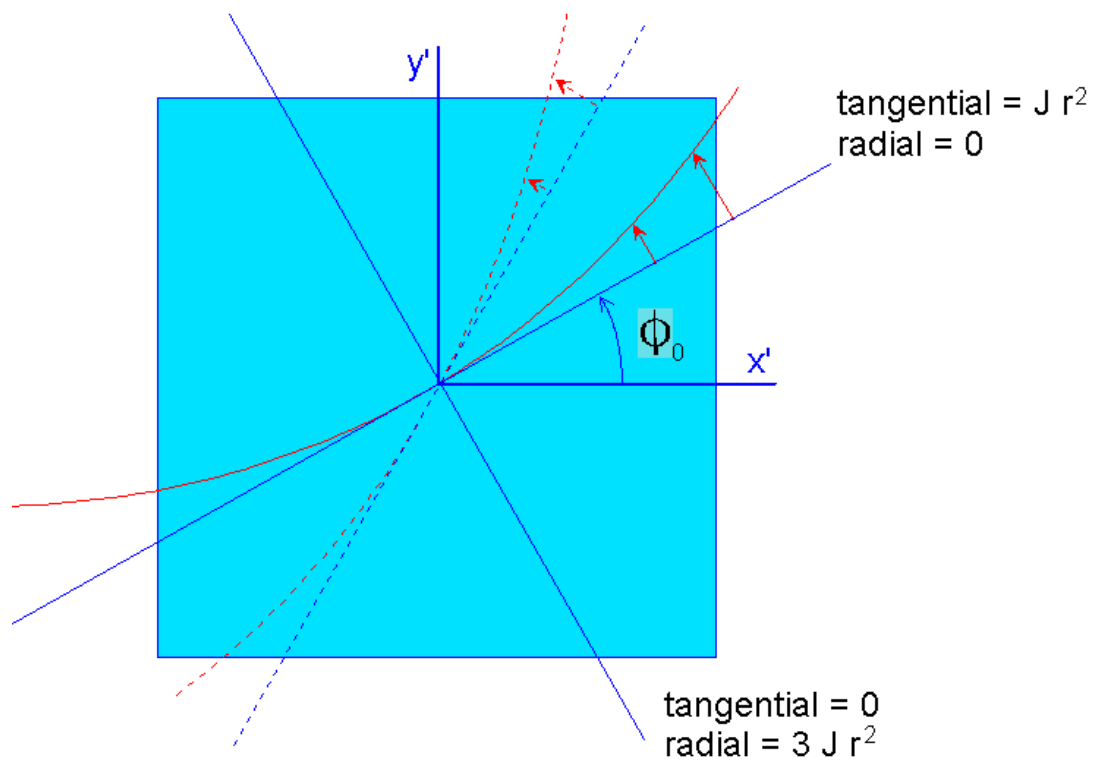
**Kameravakio**  $c$  on suure, jonka arvo määritetään kamerakalibroinnin yhteydessä. Piirtovirheet  $dr'$  lasketaan tällä kameravakion arvolla kuvapisteen pääpiste-etäisyyden  $r'$  suhteen. Piirtovirhe voitaisiin laskea myös kameravakion korjauksena  $dc$ , jolla korjattaisiin pisteen kamerakoordinaattia  $z = - ( c + dc )$ . Näin ei kuitenkaan käytännössä tehdä, koska silloin kaikille kuvapisteille saataisiin erisuuruiset  $z$ -koordinaattiarvot. Sen sijaan piirtovirheet korjataan kunkin pisteen kamerakoordinaateista  $x$  ja  $y$ , ja ne saavat samansuuruiset  $z$ -koordinaattiarvot ( $z = -c$ ).

### Tangenciaalinen piirtovirhe



EpäkeskisyySpiirtovirhe johtuu osalinssien suuntausvirheestä objektiivin valmistuksessa.





Epäkeskisyyssiirtovirhe sisältää säteen suuntaisen (radiaalisen) ja sitä vastaan kohtisuoran (tangentialisen) osan. Kuvan lävistäjällä, joka muodostaa kuvan x-akselin kanssa kulman  $\Phi_0$ , tangentialinen osa on suurimmillaan eikä radiaalista osaa ole lainkaan, kun taas tätä vastaan kohtisuoralla lävistäjällä osat ovat päinvastoin.

$$\delta d_r = 3 (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \sin(\phi - \phi_0)$$

$$\delta d_t = (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \cos(\phi - \phi_0)$$

$$\delta d_x = P_1 (r^2 + 2 x'^2) + 2 P_2 x'y'$$

$$\delta d_y = 2 P_1 x'y' + P_2 (r^2 + 2 y'^2)$$

$$r^2 = x'^2 + y'^2$$

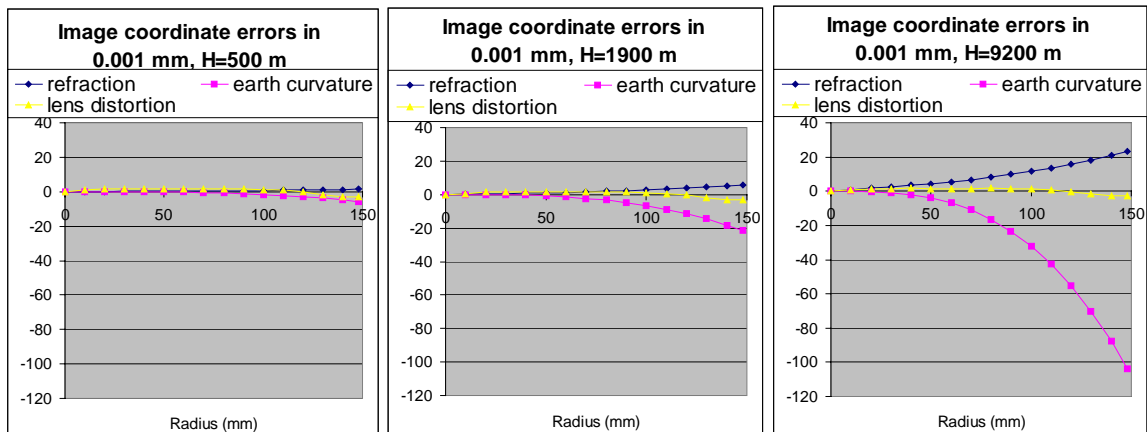
$$P_1 = J \sin \phi_0$$

$$P_2 = J \cos \phi_0$$

$$J = \sqrt{P_1^2 + P_2^2}$$

$$\tan \phi_0 = \frac{P_1}{P_2}$$

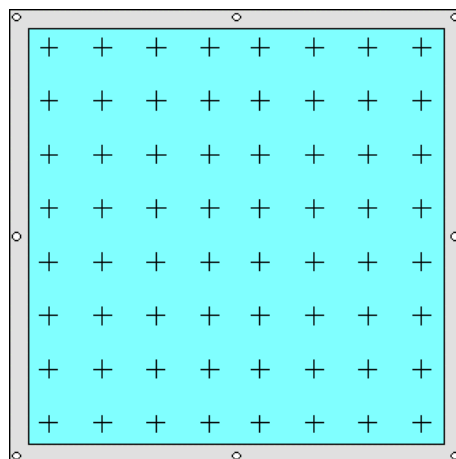
Epäkeskisyyssiirtovirheen vaikutus kamerakoordinaatteihin.



Refraktion, maankaarevuuden ja radiaalisen piirtovirheen vaikutus kuvakoordinaatteihin kuvattaessa 500 m, 1900 m ja 9200 m korkeudesta.

## Sisäinen orientointi

- Sisäinen orientointi on kuvattu kameran kalibrointitodistuksessa:
  - [Fotogrammetrian yleiskurssi, luento 4](#)
  - vakioreunamerkit,
  - pääpisteet
  - kameravakio.
- Kamerassa voi olla kuvaportin reunamerkkien lisäksi réseau-gitteri. Gitteri on lasilevy, joka sijaitsee kameran kuvaportissa. Gitteri on erittäin tarkka tasavälinen rististö, joka kuvautuu filmille. Gitteriristien avulla kamerakoordinaatisto määritetään tasaisesti yli koko kuva-alan ja tarkemmin kuin pelkillä reunamerkeillä. Tällä on merkitystä korjattaessa kuvahavainnoista filmin muodonmuutoksista aiheutuvia virheitä.



Reseau-ristikko kameran kuvaportissa.

## Kalibrintimenetelmät

- Perinteisten ilmakuvakameroiden tyypillinen kalibrintimenettely on ollut laboratorio-kalibrointi (komponenttikalibrointi), jota on tarvittaessa täydennetty itsekalibroinnilla. Laboratoriokalibrointi on tyypillisesti suoritettu 2-3 vuoden välein, tai tarvittaessa kun

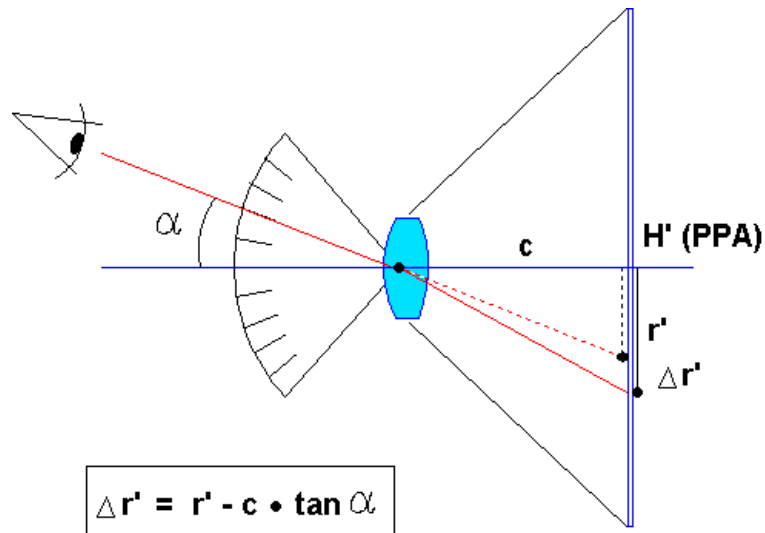
on epäilty kalibroinnin muuttuneen (FKS 1995, Luento 2). Testikenttiä on käytetty jonkin verran järjestelmien tarkastuksessa (FKS 1995, Luento 2). GPS/IMU-järjestelmien käyttöönotto ja suorageoreferointi ovat tehneet testikenttäkalibroinnin välttämättömäksi. Testikenttäkalibrointia voidaan tarvittaessa parantaa käyttämällä ns. in-situ kalibrointia (kuvataan kuvausalueella sopiva kalibrointiblokki) tai itsekalibroinnilla.

- Komponenttikalibrointi
  - Systemaattiset virheet määritetään laboratorio-olosuhteissa. Virheet voidaan erottaa toisistaan koejärjestelyin. Välineistönä käytetään goniometrejä, multikollimaattoreita ja nykyisin myös ”kalibrointihäkkejä”.
  - Kalibroitavat ominaisuudet (filmikamerat)
    - kameravakio
    - pääpisteet
    - kuvaportti
    - piirtovirheet
    - optiikan ja filmin erotuskyky
  - Digitaalisten ilmakuvakameroiden (Luento 3) kalibrointimenettelyt tulevat poikkeamaan filmikameroiden menettelyistä.
    - Geometrinen kalibrointimenettely riippuu kameran rakenteesta. Monesta kamerasta koostuvien systeemien (multihead systems) kalibrointiin tulevat kuulumaan yksittäisten sensoreiden kalibrointi (single head calibration) sekä koko kamerasysteemin kalibrointi (platform calibration). Koska useasta kamerasta koostuvat systeemit eivät ole täysin stabiileja, lopullinen kalibrointi määritetään kuvatuotannon aikana tehtävänä itsekalibrointina.
    - Tärkeä osa kalibrointia on radiometrian kalibrointi.
    - Kirjallisuutta:
      - USGS:n kalibrointityö: <http://calval.cr.usgs.gov/crs/index.php>
      - EuroSDR:n kalibrointiverkko: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/eurohdr/index.html>
      - Cramer, M., 2004. EuroSDR network on digital camera calibration – Report Phase I (Status =ct 26, 2004). <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/eurohdr/EuroHDR-Phase1-Report.pdf>
- Testikenttäkalibrointi
  - Järjestelmän systemaattiset virheet määritetään käytännön olosuhteissa tarkasti tunnetun testikentän avulla. Virheet määritetään blokkitasoituksen yhteydessä ja erotetaan toisistaan lisäparametrein.
  - Kalibroitavat ominaisuudet
    - kameravakio
    - pääpisteet
    - piirtovirheet
    - filmin muodonmuutosmalli
    - refraktiomalli
    - kuvausjärjestelmän erotuskyky
  - Nykyisin testikenttäkalibroinnilla määritetään myös GPS/IMU/kamera-järjestelmän kalibrointi. Tällöin keskeisiä kalibroitavia suureita ovat kameravakio, pääpiste ja IMU:n ja kamera-akseliston väliset kallistukset.
- Itsekalibrointi

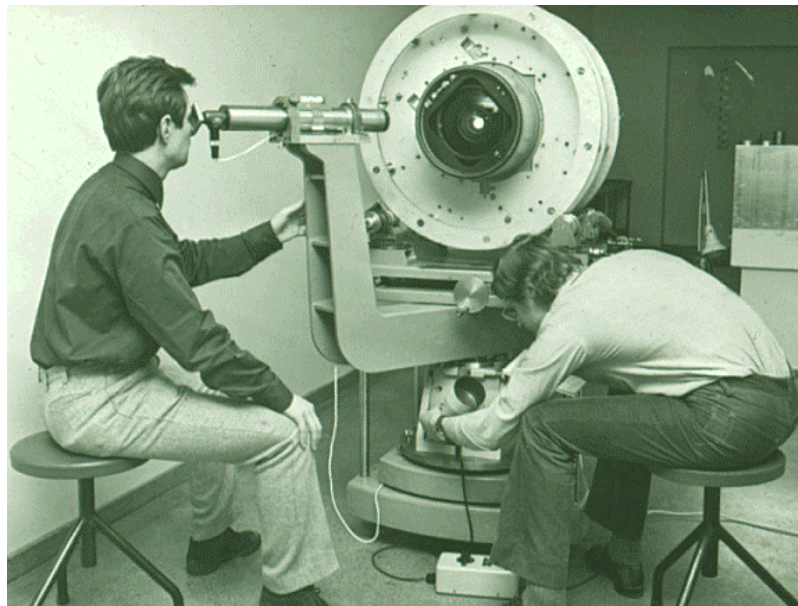
- Systemaattiset virheet pyritään huomioimaan kartoitusprojektin kolmiointivaiheessa lisäparametrein. Näille estimoidaan arvot samanaikaisesti muiden parametrien avulla. Lisäparametrit määrittyvät blokin sisäisten liitospistehavaintojen ja ulkoisten lähtöpistehavaintojen perusteella. Erona testikenttäkalibrointiin nähden on se, että testikentän lähtöpisteistö on tiheydeltään ylimääritetty, kun taas itsekalibroinnissa lähtöpisteistö on sama, joka kartoitusalueella on käytössä.
- Virheiden määrittävyys riippuu suuresti blokin geometriasta. Yleensä tässä määritetään
  - pääpiste
  - symmetrinen piirtovirhe
- Luento 5

## Goniometrikalibrointi

- Goniometri on laite, joka rakentuu kollimaattorin kahdesta kaukoputkesta. Toinen on kiinteä, toinen kiertyy keskisesti asetetun vaakakehän suhteen. Kamera asetetaan goniometriin siten, että kameran kuvaportti on kohtisuoraan kiinteätä kollimaatiosuoraa vastaan ja objektiivin tulopupilli luodattu vaakakehän keskipisteen suhteen. Goniometrillä havaitaan objektiivin piirtovirheitä siten, että kuvatasoon asetetaan pääpisteen suhteen keskisesti mitta-asteikko. Mitta-asteikkoa havaitaan kääntyvällä kaukoputkella objektiivin läpi. Vertaamalla vaakakehältä luettuja kulmia mitta-asteikon ja kameravakion avulla laskettuihin kulmiin, voidaan piirtovirheet määrittää.
- Suomessa olevat goniometrit ovat tyypiltään edellä esitetyn kaltaisia ns. horisontaaligoniometrejä. Ne soveltuvat ilmakuvakameroiden laboratoriokalibrointiin (TKK:ssa, kuvakoko 230 mm x 230 mm, objektiivin polttoväli  $c = 150$  mm) ja pienempien ilmakehän ja kinofilmikoon kameroiden kalibrointiin ([Joensuu yliopistolla](#), kuvakoot 6 cm x 6 cm ja 24 mm x 36 mm).
- Vertikaaligoniometreissä on yleensä useita kiinteitä kollimaattorikaukoputkia (esim. NRC:n multikollimaattorigoniometri). Tällaisia ei ole Suomessa. Vertikaaligoniometrin etuna pidetään sitä, että kamera on kalibroinnin ajan kuvausasennoissa. Kameran raskaan rakenteen mahdollisesti aiheuttama vaikutus kalibrointitulokseen voidaan näin minimoida.
- Julkaisuja
  - Hakkarainen, Juhani, 1973. Ilmakuvakameran kaartuman määrittäminen goniometrillä ja ilmakehän ja ilmakehän objektiivin laadun tutkiminen, lisensiaattityö, TKK:n Maanmittausosasto, 1973.
  - Hakkarainen, Juhani, 1976. On the Use of the Horizontal Goniometer in the Determination of the Distortion and Image Quality of Aerial Wide-angle Cameras. Väitöskirja, TKK:n Maanmittausosasto, 1976.
  - ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 8.5, Calibration. s. 645-668.



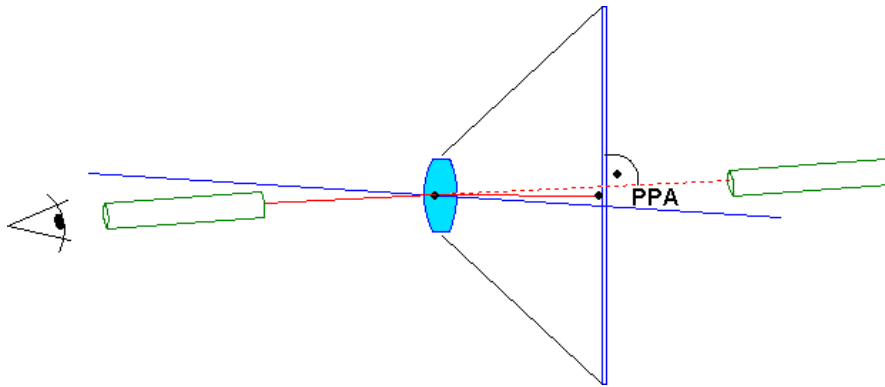
Goniometrimittauksen periaate.



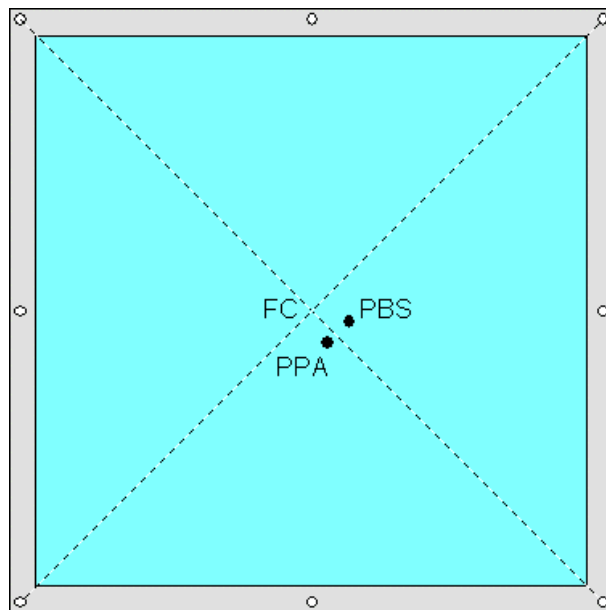
TKK:n horisontaaligonometri.

## Pääpisteet

- Kameran kalibrointitodistuksessa mainitaan toisinaan pääpiste kolmella eri tavalla:
  - **FC = Fiducial Center**, eli reunamerkkien kautta piirrettävien suorien leikkauspiste. Analogiakojeissa pääpisteenä voidaan käyttää ainoastaan FC:tä. Kalibrointitodistuksissa piirtovirheet määritellään yleensä FC:n suhteen ja erikseen kullekin kuvan neljästä päälävistäjästä.
  - **PPA = Principal Point of Autocollimation** on objektiivin pääsäteen kuvautumispiste, kun pääsäde yhtyy tulopupillin puolella sellaiseen suoraan, joka on kohtisuorassa kuvatasoa vastaan.
  - **PBS = Principal Point of Best Symmetry** on symmetrisen piirtovirheen symmetriapiste, jota käytetään itsekalibroinnin pääpisteenä.



Autokollimoitu pääpiste.



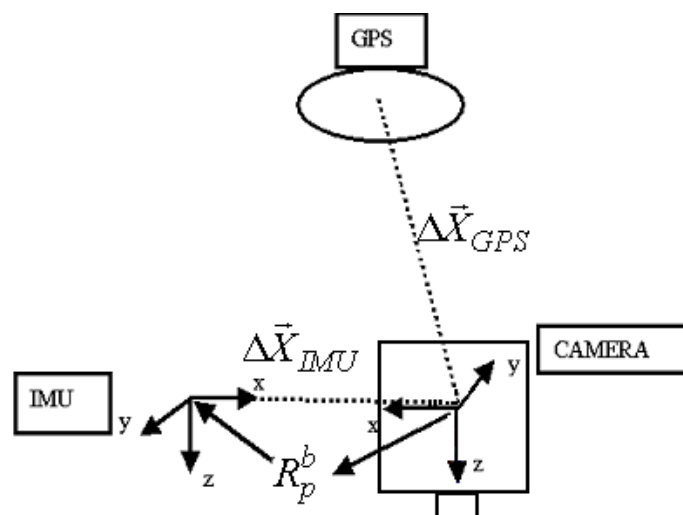
Kuvan erilaiset pääpisteet.

## Testikenttäkalibrointi ennen 2000-lukua

- Testikenttäkalibrointiä tutkittiin runsaasti 1970-luvulla. Keskeisiä johtopäätelmiä olivat:
  - Ilmakuvaus tulee tehdä vähintään kahdessa toisiaan vastaan ristikkäisessä suunnassa. Tällä on erityinen merkitys pääpisteen määrittävyydelle.
  - Mikäli halutaan määrittää myös kameravakio, testikentän tulee olla mahdollisimman kolmiulotteinen. Tällaisia kartoituskuvauksiin soveltuvia testikenttiä ei Suomessa ole, mutta esimerkiksi Saksassa ja Sveitsissä kylläkin. Aiemmin on käytetty myös tähtitaivasta kamerakalibrointiin, esimerkkinä USA (stellar calibration)
- ISPRS:n koetyö. Yhteenvedona todettiin mm. seuraavaa
  - Fysikaalinen malli riittää optiikan ja filmin muodonmuutosten määrittämiseen.
  - Kutakin blokkia kohden tulisi käyttää vain yksiä kameraparametreja, mikäli kuvat on samasta kuvauksesta (sama kamera). Jonokohtaisia parametreja pitää välttää.

- Mikäli jonojen välinen sivupeitto on alle 30 %, lisäparametrien käytössä tulee olla erittäin kriittinen.
- Lisäparametrien käyttö ei korvaa komponenttikalibrointia.
- Koetyössä käytetyt kuvaukset
  - Kuvaukset tehtiin Suomessa Jämijärven ja Australiassa Kapundan ja Willungan koekentillä. Jämijärvellä kamerana käytettiin Zeissin RMK A2 ja MRB kameroita, Kapundassa ja Willungassa Zeissin RMK AR kameraa.
- Testikentät
  - Jämijärvi 2.6 km x 2.6 km
  - Kapunda 40 km x 40 km
  - Willunga 3 km x 3 km
- Koetyön tasoitukset
  - Vertaustasoituksena tehtiin tavanomainen blokkitasoitus
    - sisäinen orientointi affiinisella muunnoksella,
    - havainnoista korjattiin symmetrisen radiaalisen piirtovirheen ja refraktion vaikutukset,
    - kuvahavaintoja painotettiin 1:llä, lähtöpisteitä äärettömällä.
  - Osa koetasoituksista tehtiin lähinnä lisäparametrien käytön vaikutusten selvittämiseksi.
  - Koetuloksia laskettiin kolmella kuvitteellisella lähtöpistekuviolla: harva, medium, tiheä.
- Testikenttäkalibrointi ei ole ollut osa fotogrammetrista tuotantolinjaa analogisten kameroiden tapauksessa, mutta digitaalinen ilmakuvauus ja GPS/IMU-järjestelmien mukaantulo ovat muuttaneet tilannetta.

## Testikenttäkalibrointi suorassa georeferoinnissa



Kalibroituavia suureita ovat:

- IMU:n ja kameras akselien välinen orientointi (boresight misalignment: fotogrammetrisesti)
- Eri järjestelmien väliset vektorit (lever arm: geodeettisin menetelmin)
  - Kamera ja GPS-antenni
  - IMU ja kamera
  - IMU ja GPS antenni

- Eri järjestelmien välinen synkronointi
- Kameran kalibrointi lento-olosuhteissa (fotogrammetrisesti itsekalloibrintina). Koska havaintoina ovat kuvanottoaikojen tarkat GPS-havainnot, myös kameravakion määrittäminen on mahdollista.

Tuntemattomat määritetään blokkitasoitusessa.

Boresight misalignment:  $R_p^m = R_b^m R_p^b$ ,

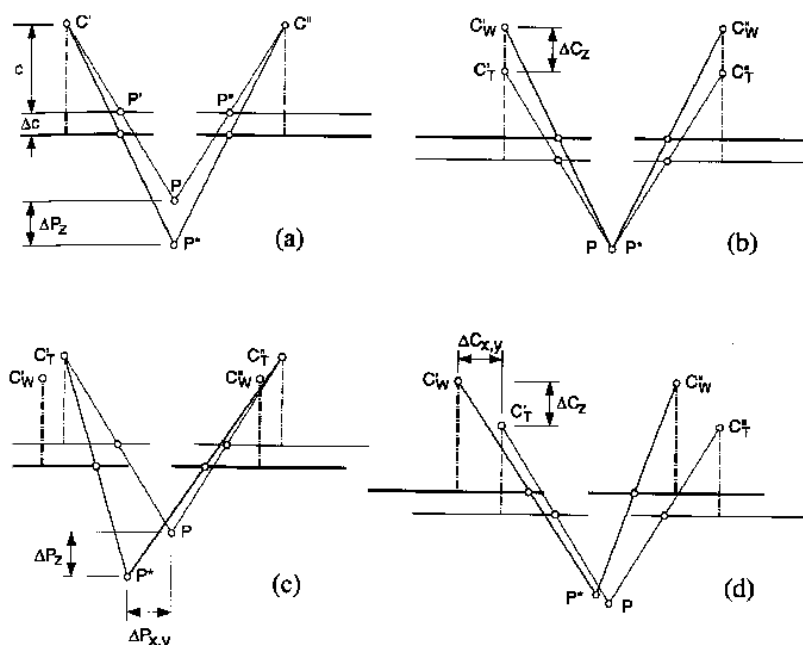
Rotation matrixes:

$R_p^m$  image frame  $\rightarrow$  object frame (AT)

$R_p^b$  image frame  $\rightarrow$  IMU body frame (boresight)

$R_b^m$  body frame  $\rightarrow$  object frame (GPS/IMU)

### Kuvausvirheiden vaikutuksesta suorassa georeferoinnissa



© Schenk, 1999

Ylläolevissa kuvissa esitetään sisäisen orientoinnin virheiden vaikutusta fotogrammetriseen pisteenmäärittäykseen suorassa ja "epäsuorassa" georeferoinnissa.

- suora georeferointi, polttovälin virheestä aiheutuva korkeusvirhe siirtyy sellaisenaan korkeuskoordinaattiin kohteessa
- epäsuora georeferointi: polttovälin virheet absorboituvat projektiokeskuksen korkeuskoordinaattiin
- suora georeferointi: pääpisteen ja polttovälin virheestä aiheutuvat virheet vaikuttavat suoraan maastokoordinaatteihin
- epäsuora georeferointi: pääpisteen virheestä aiheutuvat virheet absorboituvat suurelta osin ulkoisten orientointien parametreihin

Voidaan siis todeta, että epäsuorassa georeferoinnissa sisäisen orientoinnin virheet absorboituvat ulkoisten orientointien parametreihin, kun taas suorassa georeferoinnissa sisäisen orientoinnin virheet siirtyvät maastokoordinaatteihin mittakaavalla skaalattuna.



Sisäisen orientoinnin virheiden lisäksi myös kaikki muut kuvausvirheet siirtyvät suoraan määritettäviin parametreihin. Aihepiiriä tutkitaan paraikaa eripuolilla maailmaa.

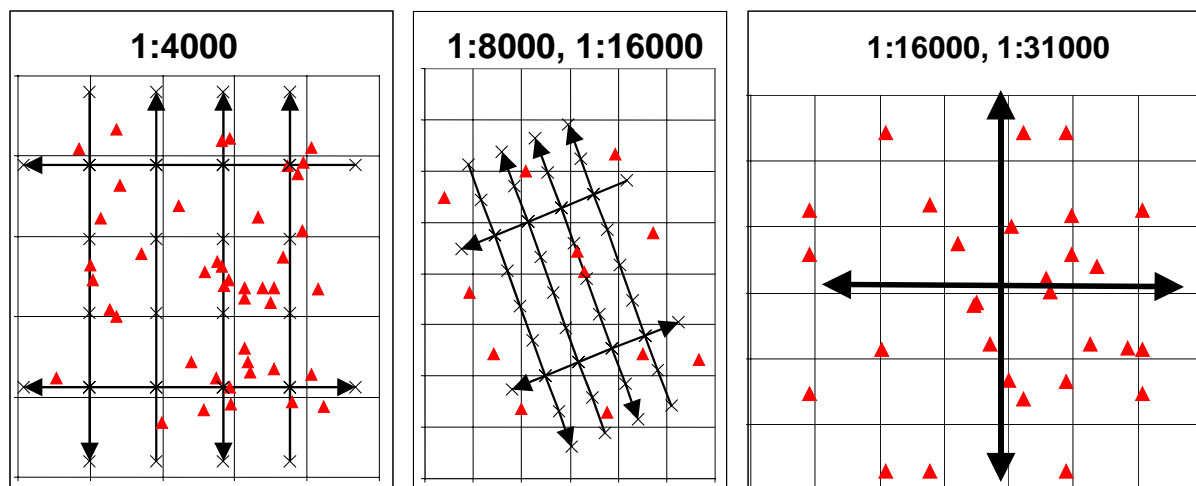
Esimerkki sisäisten orientointien virheiden vaikutuksesta suorassa ja epäsuorassa sensorientoinnissa (Schenk 1999: Digital Photogrammetry):

- Simulointi todellisella stereomallilla.  $H=4500$  m, oletettu  $c=150$  mm, todellinen  $c=150,02$  mm. Polttovälin virheestä aiheutui  $-0,67$  m korkeusvirhe suorassa georeferoinnissa. Epäsuorassa sensorientoinnissa virhe pääosin absorboitui ulkoisiin orientoihin, mallikoordinaatteihin aiheutuvat virheet olivat  $(-0,02, -0,02, 0,01)$  m X-, Y- ja Z-suunnissa. Seuraavaksi lisättiin  $-0,01$  ja  $0,015$  mm virheet pääpisteeseen. Tällöin rekonstruointivirheet olivat  $(-0,33, 0,33, -0,92)$  m suorassa georeferoinnissa ja  $(-0,03, -0,17, -0,22)$  m epäsuorassa georeferoinnissa.

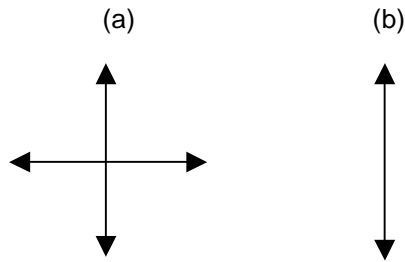
	pressurised cabin, cover glass		lens in free atmosphere, constant temperature 7°C		lens in free atmosphere temperature	
	6 km	14 km	6 km	14 km	6 km	14 km
flying height	6 km	14 km	6 km	14 km	6 km	14 km
wide angle camera f=153mm	-20 μm	-38 μm	-36 μm	-58 μm	-47 μm	-80 μm
Normal angle camera f=305mm	12 μm	-17 μm	-33 μm	-28 μm	-110 μm	-172 μm

Kameravakion muutokset erilaisilla lentokorkeuksilla ja erilaisissa olosuhteissa. Meier 1978: The effect of Environmental Conditions on Distortion, Calibrated Focal Length and Focus of Aerial Survey Cameras, ISP Symposium, Tokyo, May 1978.

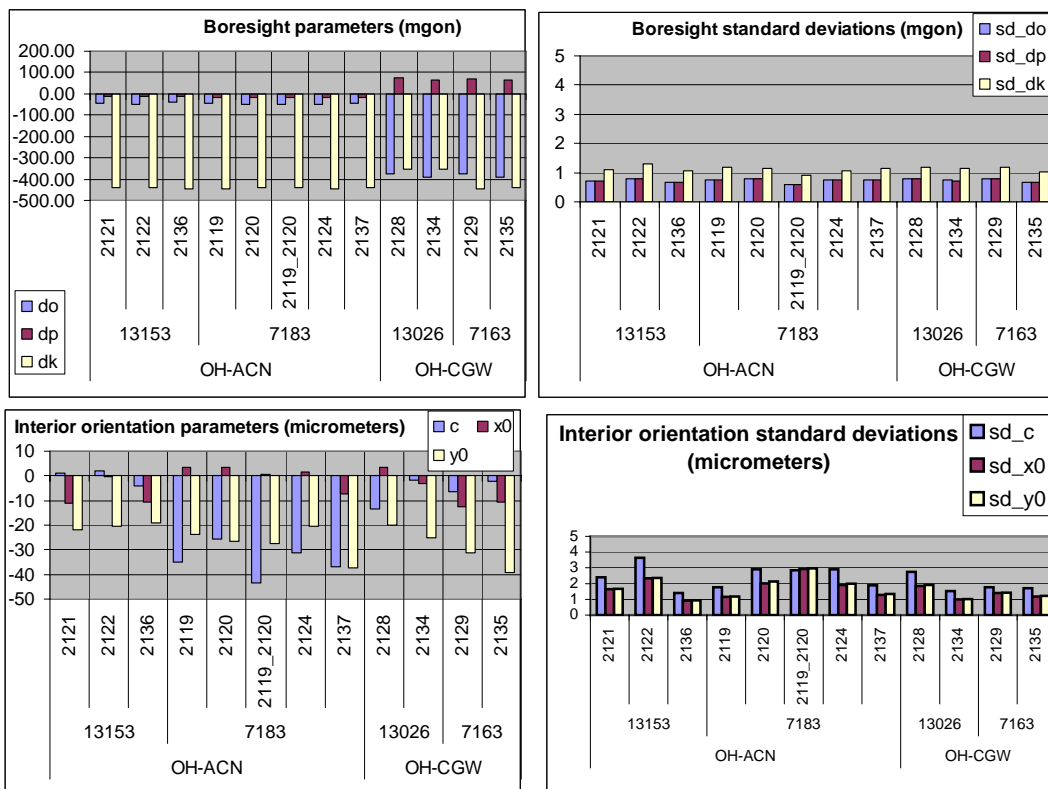
### GPS/IMU/kamera-järjestelmän kalibrointi Geodeettisen laitoksen Sjäkullan testikentällä



Geodeettisen laitoksen testikentällä (<http://www.fgi.fi/osastot/foto/projektit/kalibr.html>, Luento 2) Sjäkullassa voidaan kalibrointi suorittaa mittakaavoissa 1:3000-1:4000, 1:6000-1:16000 sekä 1:16000-1:31000. Jämsän kentällä kalibrointi voidaan suorittaa mittakaavoissa 1:16000-1:31000. Ylläolevissa kuvissa näytetään esimerkit 1:4000, 1:8000/1:16000 sekä 1:16000/1:31000 testikentistä.



Käytännön työssä voidaan käyttää myös kevyempiä blokkirakenteita. Kaksi ristikkäisitä vastakkaisiin suuntiin lennettyä kuvalinjaa (a) sallivat kalibroinnin määrityksen riittävän hyvin. Edestakaisin lennetty lentolinja (b) ei ole ideaalinen täyteen kalibrointiin, mutta sillä voidaan kalibroida esim. pelkkä boresight misalignment sekä pääpiste.



Tuloksia MML:n kuvauskalustolla kesällä 2002 suoritetuista systeemikalibroinneista. Kalibroitavana oli kaksi lentokonetta (OH-ACN ja OH-CGW) joissa molemmissa laajakulma- (150 mm) ja normaalikulmaoptiikka (214 mm). Kuvausmittakaavat olivat 1:4000, 1:8000 ja 1:16000, lentokorkeudet 600 m-3500 m. Kaikilla optiikoilla esiintyi merkittävä 20-40 mikrometrin suuruinen korjaus y0-suunnassa (kohtisuora suunta lentosuuntaan nähden). Optiikalla 7183 ilmeni merkittävä korjaus myös kameravakiossa (Honkavaara et al. 2003)

## Kirjallisuutta

ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 8.5, Calibration. s. 645-668.

ASPRS 2004, Manual of Photogrammetry, Fifth Edition, Chapter 11.2.9, The Concept of Camera Self-Calibration. s. 870-879.

Cramer, M., 2004. EuroSDR network on digital camera calibration – Report Phase I (Status =ct 26, 2004). <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/euroedr/EuroSDR-Phase1-Report.pdf>

Honkavaara, E., Ilves R., Jaakkola, J., 2003. Practical Results of GPS/IMU/camera System Calibration. In. Proceedings of Workshop: Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation. Castelldefels, September 22-23, 2003.

Jacobsen, Karsten, 2002. Calibration aspects in Direct Georeferencing of Frame Images. IntArchPhRS, Com.I, Denver, Vol.XXXIV Part 1, pp 82-88. <http://www.ipi.uni-hannover.de/index1.htm>

Salmenperä, Hannu, 1989.: Fotogrammetrisen pistetihennyksen menetelmät ja sovellutukset. Kappale 3.32, Itsekalibroiva pistetihennys. Tampere 1989.

Salmenperä, Hannu, 1989.: Fotogrammetrisen pistetihennyksen menetelmät ja sovellutukset. Kappale 5.4, Kuvakoordinaattien systemaattiset virheet ja niiden korjaaminen. Tampere 1989.

Kalibrointityöryhmiä

- EuroSDR:n kalibrointiverkko: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/euroedr/index.html>
- USGS:n kalibrointityö: <http://calval.cr.usgs.gov/crs/index.php>

---

[Maa-57.220 Fotogrammetrisen kartoitus](#)

[Luento-ohjelma](#) [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) [11](#) [12](#) [13](#)